

超短脉冲激光辐照固体靶背向光发射的测量

王光昶^{1,2,3}, 郑志坚³, 杨向东^{2*}, 谷渝秋³, 刘宏杰³, 温天舒³,
葛芳芳³, 焦春晔³, 周维民³, 张双根^{2,3}, 王向贤^{2,3}

1. 成都医学院物理教研室, 四川 成都 610081
2. 四川大学原子分子物理所, 四川 成都 610065
3. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘 要 利用光学 CCD 相机和 OMA 光学多道分析仪, 分别在金属箔背表面法线方向测量了光发射的积分成像光谱和散射光光谱。积分成像光谱测量结果显示, 光谱呈圆环状, 在圆环边缘附近出现局部化明亮光信号确定为超热电子输运穿越固体靶引起的光学渡越辐射(OTR); 散射光光谱测量结果显示, 光谱在 300~500 nm 之间出现一系列非周期锐利尖峰, 在 400 nm(2 ω)附近出现的尖峰归结于 $v \times B$ 加热机制产生的超热电子束中的聚束引起的相干渡越辐射(CTR)。渡越辐射光强随靶厚度的增加而减小。

主题词 光发射; 光学渡越辐射(OTR); 超热电子; $v \times B$ 加热机制; 相干渡越辐射(CTR)

中图分类号: O536 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2006)05-0785-05

引 言

在激光惯性约束聚变“快点火”方案中, 点火激光的能量首先交给超热电子, 超热电子经过输运后到达高密度燃料区的边缘并加热氘氚离子形成热斑而实现点火。但是超短超强激光产生的超热电子流很强, 甚至超过 Alfvén 极限。如此强的超热电子流是如何输运的, 效率如何, 是否会产生成丝效应而引起严重的不稳定性等, 有很多物理问题还不清楚。因此超热电子的输运问题的研究将直接关系到“快点火”方案的物理设计, 甚至物理可行性。最近, 有人提出, 通过测量另一种辐射现象也就是渡越辐射来研究超热电子的更详细的情况^[1-3]。因此, 渡越辐射的测量, 能够获取超热电子输运的一些相关信息, 对于“快点火”方案的实施是至关重要的。

渡越辐射就是带电粒子穿越两种不同的介电常数媒质的交界面时而产生的一种电磁辐射, 在光学波段的电磁辐射称为光学渡越辐射(optical transition radiation 简称 OTR)。光学渡越辐射(OTR)由非相干渡越辐射(ITR)和相干渡越辐射(CTR)组成。ITR 信号较弱, 测量比较困难; 而 CTR 信号强度远远大于 ITR 强度, 实验上较容易探测到。本文报道了首次对金属箔靶背表面光发射的测量实验。在 Santos 等^[2]和 Baton 等^[3]的研究中, 他们观察到了光谱范围从 370 到 880 nm 的宽带光发射。在 Zheng 等^[4]的研究中, 他们的测量集

中在 1 053 nm 附近的窄带光发射上。与他们不同, 我们的测量集中在 300~500 nm 之间的光发射上, 利用光学 CCD 相机和 OMA 光学多道分析仪直接测量光发射。我们确定明亮局部化光信号和一系列锐利尖峰应归结于超热电子输运穿越固体靶引起的相干渡越辐射(CTR)。

1 实验设置和方法

实验是在中国工程物理研究院(CAEP)激光聚变研究中心高温高密度等离子体国家重点实验室的 100TW 掺钛蓝宝石激光器上进行的。该激光器采用标准啁啾脉冲放大技术(CPA), 其技术指标为: 激光能量 $E = 2 \sim 3$ J, 波长 800 nm, 主激光带宽 50 nm, 脉冲宽度 30 fs, 靶室的真空度为 1.5×10^{-2} Pa。

实验布局如图 1 所示, 圆柱形的靶室四周侧壁上接有法兰, 通过法兰口将压缩后的激光引入靶室。镀膜反射镜将压缩后的激光引到 $f/3$ 的离轴抛物面镜上, 抛物面镜再将此激光束聚焦在靶面上。靶架由一个五维步进电机控制, 确保每发激光能够打在靶面的不同位置上。抛物面镜架由另一个三维步进电机控制, 用于调节激光的聚焦。靶室外设置一台长焦距显微镜, 用于监测激光聚焦状态, 确保每一发激光都处于良好的聚焦状态。

收稿日期: 2005-03-28, 修订日期: 2005-06-26

基金项目: 四川省青年科技基金(06ZQ026-053)和成都医学院院长科技基金(05Z2005-001)资助项目

作者简介: 王光昶, 1969 年生, 成都医学院物理教研室博士研究生 * 通讯联系人

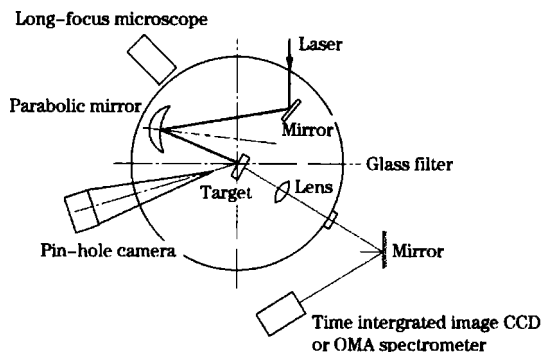


Fig 1 Scheme of the experimental setup

实验采用铜膜靶, 厚度分别为 3, 7, 15, 30, 50, 80 和 30 89 μm 。采用针孔配合 X 射线 CCD 相机测量激光焦斑, 典型的测量结果如图 2 所示。所测焦斑直径约为 48 μm (FWHM)。

靶室外放置光学积分成像 CCD 相机或高分辨率 (0.1 nm) 的 OMA 光学多道分析仪, 分别在靶背法线方向进行测量。由于探测范围和减小光强的需要, 在探测光路中适当加带通滤光片。铜膜靶背表面光发射信号由空间分辨装置 (消色差光学透镜) 经过聚焦成像引到 CCD 或者 OMA 谱仪的狭缝上。光学 CCD 相机或 OMA 谱仪的输出端与计算机结合并连接图像采集卡, 这样, 光发射信号由计算机来记录光谱。

2 实验结果

实验中激光与靶法线方向成 2° 角入射到铜膜靶面上, P

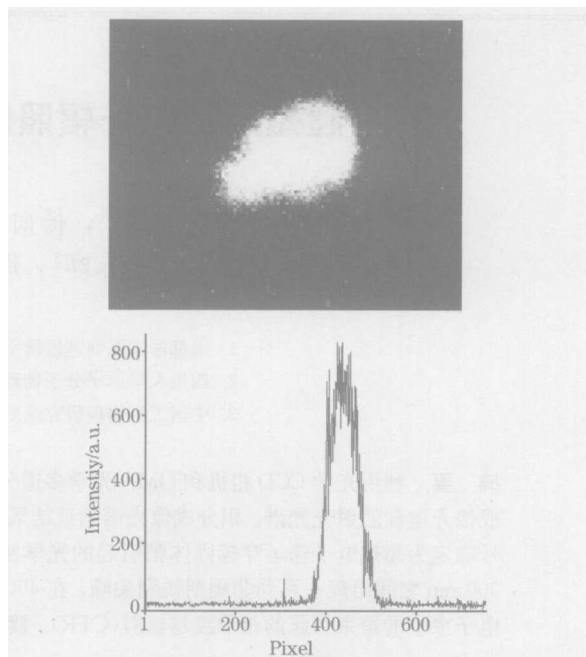


Fig 2 Image of laser focus and scan profile

偏振。

2.1 光学 CCD 相机测量结果

实验参数是: 激光能量为 2 J, Cu 靶厚度 $d = 3, 7, 15, 30, 50, 80 \mu\text{m}$, 由公式

$$I = \frac{E}{s \cdot t} \quad (1)$$

式中 s 是激光焦斑面积, t 是激光脉冲持续时间。

计算出靶面激光峰值功率密度约为 $I = 3.7 \times 10^{18} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。典型的测量结果如图 3 所示。

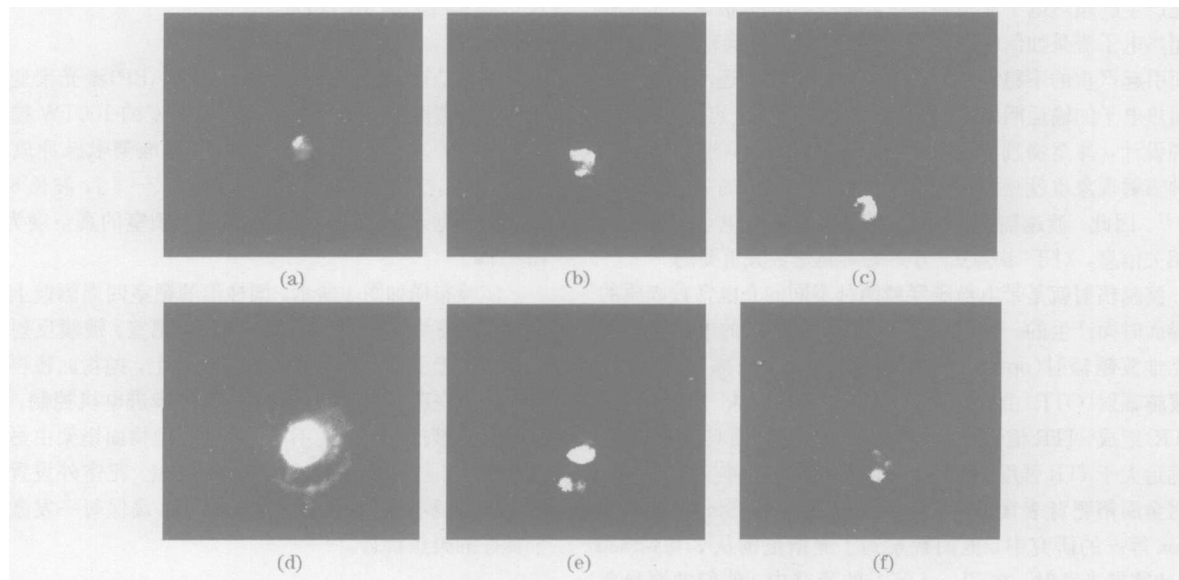


Fig 3 Spectrum of integrated image of CTR

a: 3 μm ; b: 7 μm ; c: 15 μm ; d: 30 μm ; e: 50 μm ; f: 80 μm

图 3(a)~(f) 是在靶背法线方向测得光发射时间积分成像光谱图。光谱类似圆环状, 光信号呈明亮局部化分布。随

着靶厚度的增加, 光信号区域先增加然后又减小。

对图 3 所测实验数据进行统计, 结果如图 4 所示。黑点

代表实验数据点,光滑曲线是 Lorentz 拟合曲线。从图中可以看出,随着靶厚度的增加,CTR 强度呈明显下降的趋势。但 $7\text{ }\mu\text{m}$ 厚度靶的强度比 $3\text{ }\mu\text{m}$ 厚度靶强度还高,并且大约在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 处出现强度转折。在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 之前,CTR 强度随着靶厚急剧下降;在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 之后,CTR 强度随着靶厚下降比较平缓。

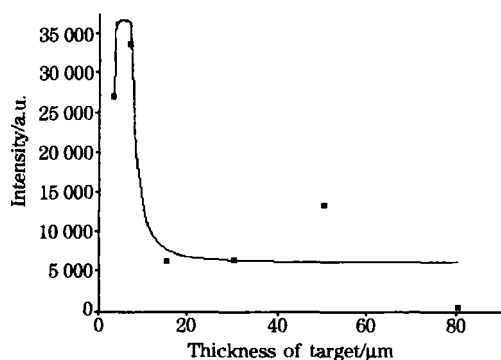


Fig 4 Relevancy of CTR intensity with thickness of target

■: B; —: Lorentz fit of data B

2.2 OMA 谱仪测量结果

实验参数是:激光能量为 3 J ,由(1)式计算出,靶面激光峰值功率密度约为 $I = 5.53 \times 10^{18}\text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,靶 $\text{Cu} = 30.89\text{ }\mu\text{m}$ (靶的厚度)。

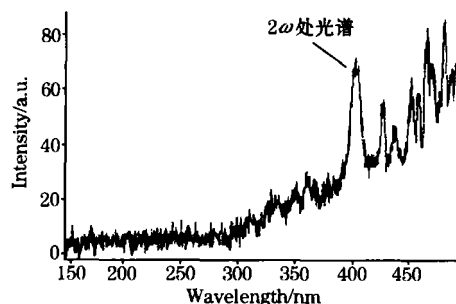


Fig 5 Spectrum of coherent transition radiation

图5是用 OMA 谱仪在靶背法线方向测得 CTR 光谱图。光谱在 $300\sim 500\text{ nm}$ 之间出现一系列非周期锐利尖峰结构,在 400 nm (2ω)附近出现的尖峰明显可见。图中横轴为波长,纵轴为相对强度。

3 分析与讨论

根据 Santos 等^[2]和 Baton 等^[3]对靶背探测到的光信号观察结果可知(如图3所示),圆环边缘附近出现的明亮的局部化光信号是由于超热电子输运穿越固体靶在靶背引起的 OTR。而光信号的圆环状空间分布,与在 2002 年卢瑟福实验室的年报中 Santos 等^[5]报道的靶背有电子束引起的渡越辐射的环形分布极其相似。明亮的局部化光信号的分布表明,超热电子在传输的过程中存在成丝效应引起不稳定性,超热电子束并不均匀分布。

对图4的统计结果进行分析,超热电子在传输的过程中引起电子回流而形成分离电场,由于分离电场的周期变化对超热电子又进行重新调制,从而会产生特殊的现象。例如,随着靶厚度的增加,光信号区域先增加然后又减小,CTR 强度呈明显下降的趋势,并且大约在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 处出现强度转折;光谱在 $300\sim 500\text{ nm}$ 之间出现一系列非周期锐利尖峰结构。所有这些情况都可能与分离电场的周期变化对超热电子又进行重新调制相关联。

超短超强激光与固体靶相互作用在靶的前表面产生大量的超热电子,超热电子形成的电流在靶内传播,远大于 Alfvén 极限电流,若靶的厚度不大时,超热电子将从靶的后表面穿出形成渡越辐射。单个电子在单位频率间隔和单位立体角内的光学渡越辐射(OTR)可表示为^[6]

$$\frac{d^2 I(\omega, \theta)}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2 \beta^2}{4\pi^2 c} \cdot \frac{\sin^2 \theta}{1 - \beta^2 \cos^2 \theta} \quad (2)$$

其中, $\beta = v/c$, θ 为渡越辐射的出射角。对一束数量为 N 的电子束的渡越辐射强度为

$$I_{\text{total}} = I(\omega)[N + N(N-1)f(\omega)] \quad (3)$$

其中 $f(\omega)$ 为电子束的纵向分布函数 $S(z)$ 的空间自相关

$$f(\omega) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} dz S(z) e^{i\omega z/c} \right|^2 \quad (4)$$

由于超短超强激光产生的超热电子可看成间隔周期为激光周期的 δ 微脉冲,每个脉冲的电子数量为 N_n ,具有 Maxwellian 速度分布,其温度符合定标律

$$T_{\text{hot}} = 100(I_{17} \lambda^2)^{1/3} \text{ keV}$$

其中, I_{17} 是以 $10^{17}\text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 为单位的激光功率密度, λ 为激光波长。则 $S(z) = \sum_0^n N_n \delta(z - 2\pi n\omega/\omega_0)$ 。在式(3)中,第一项为所有电子辐射的几何叠加项,第二项为相干项。于是在第二项中出现以激光频率为间隔的强度调制。对于 2ω 处的相干渡越辐射的峰值强度 $I_{\text{total}}(2\omega) \propto N^2 f(2\omega)$ 。这样可以通过相干渡越辐射强度反映穿过界面的电子束流特性及判定超热电子占主导地位的加热机制。

根据 Zheng 等^[7]的理论计算可知,渡越辐射光谱是很强的,是由于在一些特殊频率附近的干涉效应(强度调制),即在那里沿着电子束的周期波动。如果在那里没有干涉效应,那么渡越辐射光谱将是宽带几乎是平坦的。众所周知,电子可以在许多过程中被加速。在一些过程中,例如共振吸收和真空加热,电子在每一激光周期被加速一次,而在 $v \times B$ 加热机制中,电子在每一激光周期被加速两次。显而易见,产生在这些过程中的高能电子束是由一系列电子微脉冲组成。两个邻近的微脉冲之间的时间间隔 τ 将等于驱动力周期或半周期,也就是激光的周期 $\tau = \lambda_0/c$ 或 $\tau = \lambda_0/2c$ 。那么就可以推出,超热电子束获得沿着它们传播的周期波动是由于加热过程。如果这些波动能够幸存于直到束传播穿过靶背表面为止,那么渡越辐射在聚束频率 $1/\tau$ 或 $2/\tau$ 上变成干涉及在这个频率上是非常强的。光谱因而呈现出在 ω 或 2ω 附近的狭窄的光谱线即出现锐利的尖峰结构。因此,图4所示 2ω 处(400 nm)光谱是超热电子在每一激光周期被产生两次的直接证据,也就是 $v \times B$ 加热机制产生的超热电子引起的相干

渡越辐射(CTR)。

除了上面的讨论之外,我们还可以从光发射产生的物理机制加以说明。首先,我们可以排除入射激光直接进入的可能性。因为靶不透明,并且在探测光路中挡有 800 nm ϕ 度全反射镜。除了渡越辐射以外,在靶背表面产生光学波段的自发光还有以下几种:

(1) 冲击波发光, 根据文献[8] 对冲击波的实验测量与分析可知, 冲击波光信号出现的时间晚(几百 ps), 波形是宽带连续谱(光谱范围在 250~ 500 nm), 也称作普朗克谱, 与我们探测到的光谱毫无相似之处, 可以排除。

(2) 黑体热辐射发光, 超热电子及其关联机制加热冷的和扩展的等离子体发光。这种辐射的时间比冲击波发光时间还长。在文献[2] 中, Santos 等测量了靶后自发光的时间特性, 实验证明这种热辐射确实存在但相对来说较弱, 可不考虑。

(3) 同步加速器辐射发光, 超热电子离开靶背后引起强的静电鞘电场, 鞘电场将超热电子重新拉回靶内部约与德拜长度相同的距离, 它们的运动“反转”重新进入靶将产生同步加速器辐射。但这种辐射主要由外流的低能电子产生的, 对相干渡越辐射的贡献并不大。文献[3] 中 Baton 等对实验光

谱的分析也说明了这一点。

4 结 论

在 100TW 飞秒激光器上, 我们首次测量了用超短激光脉冲照射铜金属薄膜靶在靶背表面的光发射。OTR 积分成像光谱呈圆环状, 在圆环边缘附近出现局部化明亮光信号, 说明超热电子在传输的过程中存在不稳定性; 散射光光谱在 300~ 500 nm 之间出现一系列非周期锐利尖峰结构, 在 400 nm(2ω)附近出现的尖峰明显可见, 所有这些光发射光谱应归结于超热电子输运穿越固体靶引起的相干渡越辐射(CTR); OTR 光强随着靶厚度的增加而减少。我们只不过对 OTR 光谱强度进行了相对测量, 但还无法测出绝对定量结果。不过, 文献[9] 的光谱强度的测量方法值得我们去借鉴, 能否应用到 OTR 光谱强度的测量上, 还必须经过仔细分析和研究才行。

致谢: 非常感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心激光工程部的王晓东、周凯南、郭仪等人的大力支持和帮助。

参 考 文 献

- [1] Baton S D, et al. Inertial Fusion Science and Applications, Paris: Elsevier, 2002. 375.
- [2] Santos J J, Amiranoff F, Baton S D, et al. Phys. Rev. Lett., 2002, 89(2): 025001-1.
- [3] Baton S D, Santos J J, Amiranoff F, et al. Phys. Rev. Lett., 2003, 91(10): 105001-1.
- [4] Zheng Jian, Tanaka K A, Sato T, et al. Phys. Rev. Lett., 2004, 92(16): 165001-1.
- [5] Santos J J, Amiranoff F, Baton S D, et al. High Power Laser Programme Short Pulse Plasma Physics. Central Laser Facility Annual Report, 2001/2002, 4.
- [6] Lai R, Sievers A J. Phys Review E, 1994, 50: R3342.
- [7] Zheng Jian, Tanaka K A, Miyakoshi T, et al. Physics of Plasma, 2003, 10(7): 2994.
- [8] JIANG Shao en, YANG Jia min, DING Ya o n an, et al(江少恩, 杨家敏, 丁耀南, 等). Chinese Journal of High Pressure Physics(高压物理学报), 2000, 14(4): 264.
- [9] NI Qi liang, GONG Yan, CHEN Bo, et al(尼启良, 巩 岩, 陈 波, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2004, 24(1): 1.

A Measurement of Optical Emission from the Rear Surface with Solid Targets Irradiated by Ultrashort Pulse Laser

WANG Guang chang^{1, 2, 3}, ZHENG Zhi jian³, YANG Xiang dong^{2*}, GU Yu qiu³, LIU Hong jie³, WEN Tian shu³,
GE Fang fang³, JIAO Chun ye³, ZHOU Wei min³, ZHANG Shuang gen^{2, 3}, WANG Xiang xian^{2, 3}

1. Teaching and Research Section of Physics, Chengdu Medical College, Chengdu 610081, China

2. Atom and Molecule Physics Institute, Sichuan University, Chengdu 610065, China

3. Research Center of Laser Fusion, Academy of Engineering Physics of China, Mianyang 621900, China

Abstract The integrated image spectrum and scattering light spectrum of optical emission at normal direction from rear side of a metallic foil were measured, employing optical CCD camera and OMA optical multi channel spectrometer. The integrated image spectrum shows that it presents a ring shape, and in the near margin of the ring shape a bright localized signal is shown, which is optical transition radiation (OTR) generated by hot electrons transport through solid targets. The scattering spectrum shows that it presents a series of nonperiodic sharp spikes between 300-500 nm, and the sharp spike is ascribed to the coherent transition radiation (CTR) generated by bunches of hot electron beams generated in $v \times B$ acceleration mechanism near 400 nm (2ω). The intensity of transition radiation decreases with the increase of the target thickness.

Keywords Optical emission; Optical transition radiation; Hot electron; $v \times B$ acceleration mechanism; Coherent transition radiation

(Received Mar. 28, 2005; accepted Jun. 26, 2005)

* Corresponding author